

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 54 164 A 1**

⑳ Aktenzeichen: 199 54 164.7  
㉔ Anmeldetag: 10. 11. 1999  
㉕ Offenlegungstag: 13. 6. 2001

D2  
⑤1 Int. Cl.7:  
**G 01 L 1/20**  
G 01 L 9/06  
G 01 N 3/56  
C 23 C 30/00

⑦1 Anmelder:  
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

⑦4 Vertreter:  
Einsel, M., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 38102  
Braunschweig

⑦2 Erfinder:  
Lüthje, Holger, Dipl.-Ing., 25469 Halstenbek, DE;  
Brand, Jochen, Dr.-Ing., 38100 Braunschweig, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Sensor zur Zustandsbestimmung von Kenngrößen an mechanischen Komponenten unter Verwendung von amorphen Kohlenstoffschichten mit piezoresistiven Eigenschaften

⑤7 Die vorliegende Erfindung betrifft einen Sensor zur Messung von aktuellen Belastungen, die auf eine Oberfläche einer mechanischen Komponente einwirken, wobei als Sensor eine vorzugsweise mit mindestens einem metallischen und/oder nichtmetallischen Element dotierte amorphe Kohlenwasserstoffschicht mit piezoresistiven Eigenschaften eingesetzt wird, die über Kontakte mit einem Messgerät in Verbindung steht; weiter betrifft die vorliegende Erfindung die Verwendung von vorzugsweise mit metallischen und/oder nichtmetallischen Elementen dotierten Kohlenstoffschichten mit piezoresistiven Eigenschaften als Sensor für Belastungsmessungen sowie ein Verfahren zur Messung aktueller Belastungen an beanspruchten Oberflächen von mechanischen Komponenten, wobei als Messsensor eine vorzugsweise mit metallischen und/oder nichtmetallischen Elementen dotierte amorphe Kohlenstoffschicht eingesetzt wird.

DE 199 54 164 A 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ganz allgemein eine Messmethodik zur Bestimmung von Zustandsgrößen wie Druck, Kraft und mechanische Belastung von mechanischen Komponenten wie z. B. Maschinenbauteilen und Werkzeugen, unter Verwendung von amorphen Kohlenstoffschichten mit piezoresistiven Eigenschaften.

Die Kenntnis und Beobachtung des aktuellen Zustandes von beanspruchten oder belasteten Oberflächen von Bauteilen oder Werkzeugen ist für die Steuerung und Optimierung von Verarbeitungsprozessen von maßgeblicher Bedeutung. Es besteht daher ein Bedarf an Vorrichtungen und Verfahren mit denen wirtschaftlich auf einfache Art und Weise die interessierenden Kenngrößen (Druck, Krafteinwirkung etc.) möglichst direkt am Ort der Entstehung/Einwirkung und im Fall von Maschinen möglichst im Betrieb zuverlässig und reproduzierbar gemessen werden können.

Um den starken Kräften widerstehen zu können, die an den Arbeitsflächen von Werkzeugen oder an den belasteten Oberflächen von Maschinenbauteilen auftreten können, müssen derartige Messvorrichtungen zur Bestimmung der aktuellen Zustandsgrößen ausreichend verschleißfest sein. Je nach Anwendung z. B. in Reibpaarungen sollten sie gleichzeitig zu den elektrischen Funktionen einen geringen Reibungswiderstand aufweisen.

In der EP 0 685 297 und WO 87/04236 werden Sensoren zur Bestimmung von Zustandsgrößen direkt an der Verschleißfläche von Werkzeugen für die Umform- und Zerspantechnik, d. h. an der Schneidkante bzw. Spanfläche, und an den Arbeitsflächen von den unterschiedlichsten Maschinenbauteilen beschrieben, wobei mit Dünnschichttechniken und mittels lithographischer Methoden an den interessierenden Stellen der Bauteile Leiterbahnen und Schaltkreise zur Bestimmung der je nach Bauteiltyp interessierenden Größen, hier insbesondere Verschleiß und Temperatur, aufgebracht sind. Die dort beschriebenen Sensoren ermöglichen zwar die direkte Messung der Zustandsgrößen am Ort der Entstehung bzw. auch im Betrieb des betreffenden Maschinenbauteils, jedoch erfordert die Herstellung der Leiterbahnen und Schaltkreise einen mehrstufigen Arbeitsvorgang. Darüber hinaus müssen sie durch Schutzschichten vor Verschleiß und den auftretenden starken Kräften geschützt werden. Dies gilt insbesondere für Anwendungen, bei denen die abrasiven oder adhäsiven Belastungen des Materials hoch sind, wie z. B. an den Arbeitsflächen von Werkzeugen.

Ein weiteres Beispiel für mechanische Komponenten, für die die Bestimmungen von Zustandsgrößen für die Arbeitsvereinfachung von Bedeutung ist, sind Verbindungselemente, wie Schrauben, Nieten, Muttern, oder Unterlegscheiben etc. Interessierende Zustandsgrößen sind hier z. B. die Vorspannkraft zum Einstellen der richtigen Schraubenvorspannung oder die Anpresskraft zur Feststellung, ob das Verbindungselement ausreichend fest sitzt bzw. ob es sich gelockert hat.

So wird in der DE 44 19 009 eine Messeinrichtung zum Messen der Vorspannkraft einer Verschraubung beschrieben, wobei eine Unterlegscheibe derart ausgestaltet ist, dass sie neben dem zentralen Schraubenloch eine radiale oder sekanten ähnliche Bohrung aufweist, wobei die lastabhängige Verformung dieser zweiten Bohrung kapazitiv gemessen wird. Für eine korrekte Messung kommt es hierbei entscheidend auf eine exakt vorgegebene zweite Bohrung an.

In der Vorrichtung gemäß der DE 69 31 1479 erfolgt die Messung der Anpresskraft über die Biegung eines auf dem Verbindungselement befestigten Kraftaufnehmers, der sich bei einem Anziehvorgang reproduzierbar in Abhängigkeit der ausgeübten Kraft verformt.

Es bestand ein Bedürfnis nach einer Messmethodik zur Bestimmung von Zustandsgrößen, insbesondere der Krafteinwirkung und dem Druck, mit der aktuell der jeweilige Zustand der interessierenden Fläche einer beliebigen mechanischen Komponente gemessen werden kann, die zudem verschleißbeständig ist, geringe Gleitreibungskoeffizienten aufweist sowie universal ohne große Abänderungen für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle angepasst und eingesetzt werden kann.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch eine Messmethodik gelöst, die als Sensor amorphe Kohlenstoffschichten mit piezoresistiven Eigenschaften einsetzt.

Im Sinne der Erfindung können "amorphe Kohlenstoffschichten" Kohlenstoffschichten ohne Wasserstoff sein, sogenannte i-Carbon (i-C)-Schichten, oder auch Kohlenwasserstoffschichten, sogenannte a-C:H-Schichten bzw. DLC-Schichten (Diamant-like-Carbon), mit oder ohne weiteren metallischen und/oder nichtmetallischen Dotierungselementen.

Sogenannte Hartstoffschichten aus amorphen Kohlenwasserstoff, abgekürzt a-C:H-Schichten oder auch DLC-Schichten (Diamant-Like-Carbon) bezeichnet, sind an sich bekannt und vielfältig in der Literatur beschrieben (z. B. R. E. Clausing et al. "Diamant und Diamant-Like Films and coatings", Plenum Press, New York, 1991). Sie zeichnen sich insbesondere durch hohe Härte, Verschleißbeständigkeit und niedrige Reibwerte aus und werden daher vielfach als Verschleißschutzschichten eingesetzt.

Es ist weiter bekannt, dass sich die Eigenschaften dieser Schichten, wie das Abnutzungs- bzw. Adhäsionsverhalten oder auch die Reibwerte durch Zusatz von weiteren Elementen beeinflussen lassen und definiert für den jeweiligen Anwendungsfall eingestellt werden können.

So wird in der EP-0-A 087 836 vorgeschlagen, diesen Schichten metallische Elemente zuzusetzen, um den nachteiligen Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Reibwerte zu vermindern.

Vollkommen überraschend und unerwartet wurde gefunden, dass sich amorphe diamantähnliche Kohlenstoffschichten, insbesondere wenn sie zusätzlich metallische und/oder nichtmetallische Elemente enthalten, ähnlich verhalten wie piezoresistive Materialien und bei Belastung, z. B. durch Druck, eine messbare Änderung des elektrischen Widerstandes zeigen. Obwohl derartige Kohlenstoffschichten vielfach Anwendung finden als Verschleißschutzschichten, ist die Beobachtung der piezoresistiven Eigenschaften vollkommen neu und noch nirgends vorbeschrieben. Mit den piezoresistiven Eigenschaften eröffnen sich für derartige Kohlenstoffschichten vielfältige weitere Anwendungsgebiete, insbesondere auf dem Gebiet der Sensorik.

Mit Hilfe der piezoresistiven Eigenschaften können diese Kohlenstoffschichten unmittelbar als Sensor zur Bestimmung von aktuellen Zustandsgrößen, wie Druck oder Krafteinwirkung, von mit diesen Schichten beschichteten mechanischen Komponenten, wie z. B. den vorstehend beschriebenen Maschinenbauteilen, Werkzeugen oder Verbindungselementen, dienen, ohne dass weitere Maßnahmen erforderlich sind.

Da diese Schichten auch auf Oberflächen mit den unterschiedlichsten Geometrien aufgebracht werden können, können sie universal für die unterschiedlichsten mechanischen Komponenten und insbesondere auch mit komplizierten Oberflächenstrukturen, wie Ecken oder Kanten, eingesetzt werden.

Durch den Einsatz von Kohlenstoffschichten mit piezoresistiven Eigenschaften können Sensoren zur Bestimmung von aktuellen Zustandsgrößen von beanspruchten Oberflächen geschaffen werden, die ohne besondere Herstellungs-

oder Anpassungsmaßnahmen universal einsetzbar sind. Mit derartigen Sensoren ist die direkte Messung auch an punktuell begrenzten Flächen selbst bei großflächigen Anwendungen möglich, und es können lokale Aussagen über den aktuellen Zustand – auch von lokal begrenzten – Messflächen erhalten werden. Durch die Ausnutzung der piezoresistiven Eigenschaften dieser Schichten kann eine vollkommen neuartige integrale Sensorik geschaffen werden.

Anders als bei den bekannten piezoresistiven Materialien können bei diesen Kohlenstoffschichten das Widerstandsniveau und die Druck-Widerstandskennlinien in Abhängigkeit von der Art und der Menge an eingebauten Dotierungselementen, vorzugsweise Metallatomen, definiert eingestellt werden. So weisen beispielsweise metallfreie DLC-Schichten spezifische Widerstände von mehr als  $10^{12} \Omega \times \text{cm}$  auf, durch den Einbau von zum Beispiel metallischen Zusatzelementen lässt sich der Widerstand jedoch erniedrigen und kann einen Wert in der Größenordnung von etwa  $10^{-4} \Omega \times \text{cm}$  annehmen.

Die erfindungsgemäß als Sensor eingesetzten Kohlenstoffschichten können mittels der bekannten Chemical- oder Physical-Vapor-Deposition-Techniken erhalten werden, wie sie vielfach in der Literatur beschrieben werden (beispielsweise ist in der EP-B-0 087 836 ein derartiges Verfahren zur Herstellung von metallhaltigen amorphen Kohlenwasserstoffschichten im Detail erläutert).

Typische Schichtdicken für die als Sensor einzusetzenden Kohlenstoffschichten liegen in einem Bereich von 10 nm–500 µm, vorzugsweise von 10 nm bis 20 µm. Es versteht sich, dass die Schichtdicke je nach dem konkreten Anwendungsfall frei wählbar ist.

Prinzipiell können alle metallischen oder nichtmetallischen Elemente des Periodensystems für den Einbau in die Kohlenstoffschichten eingesetzt werden, das heißt als Dotierungselemente, solange die erhaltenen Schichten piezoresistives Verhalten aufweisen. Besonders geeignete Beispiele sind Si, Ti, W, Cr, Ta, Nb, V, Zr, Hf, Mo, Pd, Ni, Co, Pb, Cu, Al sowie Edelmetalle wie Au, Ag, Pt, Ru, wobei Si, Ti, W und Cr besonders bevorzugt sind. Für die vorliegende Erfindung umfasst der Begriff "metallisches Element" auch Elemente, die den Halbmetallen zuzurechnen sind.

Beispiele für nichtmetallische Dotierungselemente sind Sauerstoff, Stickstoff, Argon, Fluor und Wasserstoff. Die Elemente können in die Schicht als Einzelatome, Cluster oder aber auch Dotierungs Carbide eingebaut werden.

Durch die Wahl der Art der eingebauten Elemente und deren Konzentration lässt sich der spezifische Widerstand der damit erhaltenen Schicht in weiten Grenzen frei einstellen, so dass je nach gewünschter Anwendung das Widerstandsniveau und die Druck-Widerstandskennlinie definiert eingestellt werden kann. Es lassen sich somit piezoresistive Schichten mit einstellbaren elektrischen Eigenschaften erhalten.

Hierbei wird das metallische Dotierungselement im Allgemeinen in Form von sogenannten Nanopartikeln, die in der Regel eine Größe von 5 bis 500 nm aufweisen, in die amorphe Kohlenstoffmatrix eingelagert, wobei die Abstände zwischen den Nanopartikeln in etwa die gleiche Größenordnung aufweisen. Es wird angenommen, dass die Stromführung über diese eingelagerten Partikel erfolgt. Überraschenderweise wurde nunmehr erfindungsgemäß gefunden, dass der Widerstand dieser Schichten von der äußeren Belastung wie Druckbelastung oder Deformation durch Dehnung abhängig ist.

Diese Eigenschaft beschränkt sich nicht auf die dotierungselementhaltigen metallhaltigen Kohlenstoffschichten sondern tritt auch in reinen amorphen Kohlenstoffschichten ohne Dotierungselemente auf. Es wird angenommen, dass in

diesem Fall die piezoresistiven Eigenschaften auf die Ausbildung von Inseln mit überwiegenden  $\text{sp}^2$ -Charakter, d. h. mit graphitähnlichen Bindungsverhältnissen, in einer Kohlenstoffmatrix mit  $\text{sp}^3$ -Charakter, d. h. diamantähnlichen Bindungsverhältnissen, bewirkt wird.

Beispielsweise kann die erfindungsgemäß eingesetzte Kohlenstoffschicht Kohlenstoff in einem Anteil von 20–99,9 at-%, vorzugsweise 20–95 at-%, Wasserstoff in einem Anteil von 0,1–35 at-%, vorzugsweise 5–35 at-% und Dotierungselemente zum Beispiel in einem Anteil von 0,01–35 at-%, vorzugsweise 1–45 at-% enthalten.

Selbstverständlich können die vorstehend genannten Anteile je nach den speziellen Anforderungen des konkreten Anwendungsfalles nach oben oder unten variiert werden.

Erfindungsgemäß kann die Kohlenstoffschicht ein Mehrschichtsystem mit unterschiedlicher Zusammensetzung hinsichtlich der Art und/oder Konzentration der Komponenten sein. Sie kann als Gradientenschicht ausgebildet sein, deren Aufbau über die Schichtdicke variiert.

Die konkrete Ausgestaltung der erfindungsgemäß eingesetzten Kohlenstoffschicht unterliegt keinen besonderen Beschränkungen und kann entsprechend den Erfordernissen des konkreten Anwendungsfalles erfolgen.

Falls erforderlich, können zusätzlich weitere Schichten, wie z. B. elektrisch isolierende Schutzschichten, Schichten zur Haftverbesserung oder Schichten zur elektrischen Kontaktierung vorgesehen werden.

Als isolierende Schicht eignen sich zum Beispiel auch nichtleitende a:C-H-Schichten, die zur Erhöhung des Widerstandes mit Sauerstoff und Silizium dotiert sind.

Ein Beispiel dafür ist eine a:C-H-Schicht, die zusätzlich Silizium und ggf. Sauerstoff enthält. Zur Herstellung dieser Schichten können dem Prozessgas geeignete Vorläufermaterialien wie z. B. Hexamethyldisiloxan zugesetzt werden. Schichten zur elektrischen Kontaktierung können aus dafür üblichen Metallen oder Hartstoffen bestehen.

Je nach gewünschtem Anwendungsfall können diese zusätzlichen Schichten im gleichen Prozess vor oder im Anschluss an die Ausbildung der Kohlenstoffschicht mit piezoresistiven Eigenschaften auf das jeweilige Substrat aufgebracht werden.

Die einzelnen Schichten können als diskrete Schichten ausgebildet sein, wobei jede Schicht für sich eine homogene Zusammensetzung über die jeweilige Schichtdicke aufweisen und verschiedene Schichten eine unterschiedliche Zusammensetzung im Hinblick auf die Art der Komponenten und die Komponentenmenge besitzen können.

Die Schichten können auch als Gradientenschichten ausgebildet sein, wobei innerhalb einer Schicht die Art der Komponenten und/oder deren Anteil über die Schichtdicke variiert. Je nach Anwendungsfall lässt sich die Ausgestaltung der Schicht/Schichten bzw. des Schichtsystems frei gestalten. Beispiele für mögliche weitere Schichten und die Ausgestaltung von Schichtsystemen finden sich in der vorstehend benannten EP-A-0 685 297, auf die hierfür voll Bezug genommen wird.

In einer erfindungsgemäß bevorzugten Ausgestaltung besteht das auf das jeweilige Substrat aufgetragene Schichtsystem aus sandwichartigen Mehrschichten zur gezielten Einstellung elektrischer und mechanischer Eigenschaften. Dabei können in vorteilhafter Weise Schichten mit unterschiedlichen Dotierstoffen und Konzentrationen verwendet werden.

Wie bereits vorstehend erwähnt, können die erfindungsgemäß eingesetzten Kohlenstoffschichten (i-C:H, a-C:H, Me-C:H) mittels der herkömmlichen PVD- oder CVD-Verfahren oder auch durch Kombination beider Verfahren erhalten werden. Hierbei wird für die Herstellung der entspre-

**This Page Blank (uspto)**

chenden Schichten das Dotierungselement oder die jeweiligen Elemente über Verdampfung oder Zerstäubung eines Festkörpers oder über elementhaltige Gase zugeführt.

Die Herstellung der Schichten bzw. Mehrschichtsysteme kann z. B. in einer handelsüblichen Mehrtages-sputteranlage erfolgen oder in sogenannten Durchlaufanlagen.

Anwendungen für die Erfindung ergeben sich überall dort, wo eine Messung der Bauteilbelastung von Interesse ist und hohe Anforderungen an die Verschleißbeständigkeit, Anti-Haft-Eigenschaft und an den geringen Reibwert der Oberfläche gestellt werden. Beispiele hierfür sind Umform- und Zerspanwerkzeuge, Schneid- und Stanzwerkzeuge, Form- und Presswerkzeuge, Gleit- und Kugellagerungen, Rollenlager sowie Führungen.

Von Vorteil für den Einsatz als Sensor ist zudem, dass die Größe des Widerstands vom Messstrom abhängig ist. Durch diesen Effekt ist eine gezielte dynamische Anpassung der Sensorempfindlichkeit in einem großen Bereich durch entsprechende Nachführung der Stromdichte möglich.

Durch Laserbehandlung lassen sich zudem die Druck-/Spannungskennlinien der Sensorschicht punktuell gezielt einstellen, so dass lokal verschiedene Leitfähigkeiten erhalten werden können.

Für den Einsatz als Sensor werden die Kohlenwasserstoffschichten mit piezoresistiven Eigenschaften auf in der Sensorik übliche Weise mit elektrischen Kontakten versehen und mit entsprechenden Signalverarbeitungs- bzw. Auswertungsschaltungen versehen.

In Kombination mit der erfindungsgemäß als Sensor eingesetzten Kohlenwasserstoffschicht können selbstverständlich weitere Sensoren in die betreffenden mechanischen Bauteile integriert sein, die direkt als Schicht ausgebildet sind oder auf andere Weise an dem mechanischen Bauteil vorgesehen werden, so dass eine Vielzahl von Zustandsgrößen erfasst werden kann.

So können Temperatursensoren vorgesehen werden, die eine thermische Stabilisierung ermöglichen. Der Einsatz von Temperatursensoren ist auch sinnvoll, um den Temperatureinfluss auf die erhaltenen Messwerte berücksichtigen und entsprechend herausrechnen zu können.

Beispielsweise kann der der erfindungsgemäßen Schicht inhärente Temperaturgang für die Temperaturmessung herangezogen werden. Hierbei erfolgt die Temperaturmessung an Stellen, die von Kraft- und Druckeinwirkungen unbelastet sind.

Nachstehend wird die vorliegende Erfindung beispielhaft anhand von Figuren näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1 bis 3 die Widerstandsänderung von mit verschiedenen metallischen Elementen dotierten Kohlenwasserstoffschichten in Abhängigkeit von der einwirkenden Kraft,

Fig. 4 die Widerstandsänderung von harten amorphen Kohlenwasserstoffschichten ohne Dotierung,

Fig. 5 bis 14 verschiedene konkrete Anwendungen für den erfindungsgemäßen Sensor.

Die Diagramme in den Fig. 1 bis 4 zeigen deutlich die Änderung des Widerstands von verschieden dotierten bzw. undotierten Kohlenwasserstoffschichten in Abhängigkeit von der Kraft, die auf diese Schichten einwirkt.

In den Fig. 1 bis 4 wurden die Messungen mit einem zylindrischen Kontaktstempel mit einer ebenen Kontaktfläche durchgeführt, der einen Durchmesser von 1 mm besaß.

Fig. 1 bis 2 zeigen die Widerstandsänderung bei Krafteinwirkung von harten amorphen Kohlenwasserstoffschichten mit Au-Nanokristallen, wobei in

Fig. 1: Au 43 at-%, C 54 at-% sowie weitere Dotierungselemente 3 at-%, und in

Fig. 2: Au 30 at-%, C 68 at-% sowie weitere Dotierungs-

elemente 2 at-%. Je nach Herstellungsverfahren enthalten diese Schichten bis zu 30 at-% Wasserstoff, der bei den vorstehenden Angaben über die Schichtzusammensetzung nicht berücksichtigt worden ist. Als Substrat wurde 100Cr6 eingesetzt.

Die Herstellung der Schichten erfolgte in einer Dioden-sputteranlage mit 150 mm Durchmesser belegt mit einem Au-Target (Gas: Ar 46 sccm/min; C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 4 sccm/min; Targetleistung 500 W, 13,5 Mhz).

In Fig. 3 ist die Widerstandsänderung bei Krafteinwirkung von harten amorphen Kohlenwasserstoffschichten mit W bzw. WC-Nanokristallen gezeigt mit W 10 at-%, C 88 at-%, andere Dotierungselemente 2 at-%. Die Schichten enthalten je nach Herstellungsverfahren bis zu 30 at-% Wasserstoff, der bei den vorstehenden Angaben über die Schichtzusammensetzung nicht berücksichtigt worden ist. Als Substrat wurde 100Cr6 eingesetzt, die Schichtdicke ist 2,2 µm. Die Herstellung erfolgte in einer Magnetron-Sputteranlage mit 2 W-Targets von je 800 × 190 mm<sup>2</sup> (Gas: Ar 390 sccm/min. C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 250 sccm/min; Targetleistung 2 × 6000 W, DC-Betrieb, Substratbias 100 V).

In Fig. 4 ist die Widerstandsänderung von harten amorphen Kohlenwasserstoffschichten ohne Metalldotierung gezeigt. Die Schichtdicke beträgt 2 µm. Als Substrat wurde 100Cr6 verwendet. Die Herstellungsbedingungen waren wie folgt: CVD-Sputteranlage mit Vertikalelektrode 200 × 150 mm<sup>2</sup>, Gas: Ar 70 sccm/min, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 20 sccm/min. Leistung: 500 W, 13,5 Mhz.

In den Fig. 5 bis 14 sind konkrete Anwendungsformen der erfindungsgemäß eingesetzten Kohlenstoffschicht mit piezoresistiven Eigenschaften zur Messung von aktuellen Zustandsgrößen gezeigt.

In Fig. 5 ist die Anwendung der erfindungsgemäß als Sensor eingesetzten Schicht in einem Presswerkzeug dargestellt, das aus einem unteren Pressstempel 3 besteht, der mit der erfindungsgemäßen Messschicht 2 beschichtet ist, und einem Gegenkörper 4. Der zu pressende Werkstoff, zum Beispiel ein Blech, wird zwischen den Gegenkörper 4 und dem Stempel 3 eingeführt. Diese Anordnung erlaubt die Messung der aktuellen Kraft, die im Bereich der Kontaktfläche auf den Werkstoff einwirkt.

Fig. 6 zeigt eine ähnliche Anwendungsform wie Fig. 5, jedoch mit verändertem Schichtaufbau auf dem Presswerkzeug, wodurch definierte lokale Messungen in gewünschten Zonen des Werkzeugs durchführbar sind.

Das Werkzeug wird hierbei zunächst mit einer dünnen und vorzugsweise mechanisch belastbaren isolierenden Schicht 6 beschichtet, wobei durch Aufbringung einer mechanischen Maske oder durch eine nachfolgend durchgeführte Strukturierung eine definierte Öffnung als Beobachtungsfenster 7 in der isolierenden Schicht 6 erzeugt wird. Die piezoresistivartige Messschicht 2 wird dann über die isolierende Schicht 6 gelegt. Das Beobachtungsfenster 7 erlaubt lokale Messungen in definierten Zonen.

Fig. 7 zeigt wie Fig. 6 und 5 ein Presswerkzeug, wobei jedoch aus dem Pressstempel 3 isoliert Kontakte 8 herausgeführt sind. Auch hier erfolgt zunächst der Aufbau einer isolierenden Schicht 6 mit Beobachtungsfenstern 7 und dann Beschichtung mit der erfindungsgemäß eingesetzten Messschicht 2. Die Kontakte 8 sind ebenfalls von einer Isolations-schicht 9 umgeben. Diese Ausführungsform erlaubt die Anwendung einer Messmatrix mit Beobachtungsfenstern 7 als lokal definierten Messpunkten. Die Richtung der Krafteinwirkung ist durch die Pfeile K angedeutet.

Fig. 8 zeigt ein Rollenlaufwerk, wie es zum Beispiel in der Druckindustrie angewendet wird, mit einer Hauptrolle 10 und mehreren Andruckrollen 11. Die Messung der Andruckkraft wird realisiert, indem zumindest eine der Rollen

mit der erfindungsgemäßen Schicht 2 versehen wird, hier die Hauptrolle 10, und der Widerstand entsprechend der eingezeichneten Schaltung bestimmt wird. Wie in der Figur angedeutet, können auch die Andruckrollen 11 (hier die Andruckrolle 11 links oben) bei Bedarf zugleich mit der Hauptrolle 10 oder für sich mit einer erfindungsgemäß eingesetzten Messschicht 2 versehen sein.

In Fig. 9 ist schematisch ein Zahnrad 12 dargestellt, das mit der erfindungsgemäß eingesetzten Messschicht 2 versehen ist. Hier erfüllt die Messschicht 2 neben den tribologischen Funktionen auch die Bestimmung von Kräften im Zahnflankenbereich, die mit anderen Techniken bisher nicht zugänglich sind.

In Fig. 10 ist eine Welle 13 gezeigt, die mit einem Schichtsystem als erfindungsgemäß eingesetzter Messschicht 2 versehen ist. Dabei soll die von einzelnen Kugeln oder Rollen 14 eines Lagers ausgeübte Kraft mit Hilfe der Messschicht 2 während des Betriebs kontinuierlich gemessen werden.

Anhand dieses konkreten Beispiels soll eine weitere Anwendungsform der erfindungsgemäß als Messschicht 2 eingesetzten Kohlenstoffschicht als Sensor zur lokalen Messung von Kraft oder anderen Zustandsgrößen an ansonsten nicht zugänglichen Stellen veranschaulicht werden.

Die kontinuierliche Messung in den nicht zugänglichen Lagern wird ermöglicht, indem die Welle 13 zunächst mit einer hochohmigen DLC-Schicht beschichtet wird.

Dabei wird ein CVD-Sputterprozess so geführt, dass zunächst nur die Substratelektrode – an der die Welle 13 befestigt ist – mit einem HF-Plasma bedient wird. Dabei wird neben Argon auch  $C_2H_2$  und HMDSO (Hexamethyldisiloxan) in die Prozesskammer eingeleitet. Nach der Abscheidung von einer 2 µm dicken DLC-Schicht wird der Prozess modifiziert, indem neben der Substratelektrode auch die Targetelektrode mit einem HF-Plasma beaufschlagt wird. Die Targetelektrode kann zum Beispiel aus Wolfram bestehen. In einer bevorzugten Ausführung des Prozesses wird in einem ersten Schritt nur Argon eingeleitet und das Wolframtarget gegen einen Shutter von Kontaminationen gereinigt.

In dieser Phase liegt am Substrat ein Biaspotential an, das zu einem geringen Ätzzvorgang führt.

In einer zweiten Phase wird der Shutter geöffnet und eine Zwischenschicht aus Wolfram mit einer Dicke von ca. 50 nm abgeschieden. Eine weitere Phase dient der Erzeugung einer Gradientenschicht aus Me:CH. Hierzu wird ein kontinuierlich steigender Anteil von  $C_2H_2$  zu dem Argon-Sputtergas hinzugegeben. Diese Zwischenschicht hat eine Dicke von ca. 300 nm. Nach Erreichen des Enddruckes wird der  $C_2H_2$ -Fluss konstant gehalten und eine ca. 1 µm dicke W:CH-Schicht abgeschieden, die ca. 30 at-% W enthält.

Diese Schicht wird, wie in Fig. 10 durch das Bezugszeichen 15 angedeutet, strukturiert. Dabei können bekannte photolithographische oder laserbasierende Strukturierungsverfahren zum Einsatz kommen. Dabei werden definierte Messzonen als Beobachtungsfenster 7 und Leiterbahnen einschließlich geeigneter Kontaktflächen 8 für zum Beispiel eine vom Messort entfernt angeordnete Schleifkontaktnordnung hergestellt.

Der nächste Schritt dient dem Aufbau einer isolierenden Schicht 6 auf der strukturierten Unterlage. Hierzu wird zum Beispiel eine mechanische Stencilmaske verwendet, die die Oberfläche der Welle 13 mit Ausnahme der Messzonen und der Schleifkontaktflächen abdeckt. Es wird dann eine hochohmige Schicht von ca. 1,5 µm Dicke nach dem vorstehend beschriebenen Verfahren aufgebracht. Anschließend wird die mechanische Maske entfernt.

Der weitere Schichtaufbau erfolgt, indem die Welle 13 erneut zum Beispiel in die CVD-Sputteranlage eingebaut

wird. Nun erfolgt die Abscheidung einer DLC-Schicht nach dem vorstehend beschriebenen Verfahren. Die Dicke dieser Schicht beträgt ca. 2 µm. Anstelle der DLC-Schicht kann auch eine Me:CH-Schicht auf die strukturierte W:CH-Schicht aufgebracht werden. Dabei muss der spezifische Widerstand der Schicht, der über den Me-Anteil gesteuert wird, höher sein, als der der strukturierten Unterlage. Vorteilhafterweise wird hier dann eine W:CH-Schicht mit einem W-Anteil von etwa 5 at-% eingesetzt.

Anstelle von Wolfram können auch andere Elemente Me für die Me:CH-Schicht verwendet werden, zum Beispiel Ti:CH, Ta:CH, Nb:CH etc..

Wie vorstehend bereits erwähnt, zeigt diese Ausführungsform die lokale Messung von Zustandsgrößen, hier der Kraft, in nicht zugänglichen Lagern.

In Fig. 11 zeigt die obere Abbildung den Aufbau des Schichtsystems gemäß Fig. 10 und die untere Abbildung eine schematische Gesamtansicht des in Fig. 10 dargestellten Lagers mit Welle 13, Kugeln/Rollen 14 sowie der Strukturierung 15 für zum Beispiel Kontakte 8 und Leiterbahnen.

Der Ausschnitt gemäß der oberen Abbildung in Fig. 11 zeigt hierbei die Welle 13, auf der eine hochohmige Schicht 16 nach dem vorstehend beschriebenen Verfahren abgeschieden ist. Darauf befindet sich eine strukturierte niederohmige Me:CH-Schicht 17 mit Strukturen für zum Beispiel Kontakte und Leiterbahnen sowie eine hochohmige Schicht 18 analog der hochohmigen Schicht 17 und als Messschicht 2 eine DLC- oder Me:CH-Schicht.

In Fig. 12 ist als weitere Anwendungsmöglichkeit der vorliegenden Erfindung eine Unterlegscheibe 19 gezeigt, die mit der erfindungsgemäß als Sensor eingesetzten Messschicht 2 versehen wurde, und die zur Messung und Kontrolle von kraftschlüssigen Verbindungen eingesetzt werden kann. Die hier gezeigte isolierende Schicht 6 kann zum Beispiel eine Si-O-DLC- oder  $Al_2O_3$ -Schicht sein. Als Messschicht 2 kann wiederum eine DLC- oder Me:CH-Schicht eingesetzt werden.

Fig. 13 zeigt als weitere Anwendungsform einen Schraubenkopf 20, der mit der erfindungsgemäß eingesetzten Messschicht 2 sowie einer isolierenden Schicht 6 versehen ist.

In Fig. 14 ist die Anwendung der erfindungsgemäß als Messschicht 2 eingesetzten amorphen Kohlenstoffschicht mit piezoresistiven Eigenschaften in einem Drehmeißel zur Messung der Zerspankraft gezeigt. Hier wird eine Unterlegplatte 22 (Unterlage) mit der Messschicht 2 beschichtet. Die Messschicht 2 kann ganzflächig oder in einer vorteilhaften Ausführung auch nur in einem oder mehreren separat kontaktierbaren Bereichen aufgebracht werden.

Der Drehmeißel ist mit einer Wenderschneidplatte 21, einer isolierenden keramischen Platte 23 sowie einer isolierenden Schicht 6 ausgestattet.

Wie vorstehend anhand zahlreicher Beispiele gezeigt, kann die erfindungsgemäß als Sensor zur Bestimmung von Zustandsgrößen wie Kraft oder Druck eingesetzte amorphe Kohlenstoffschicht mit piezoresistiven Eigenschaften variabel eingesetzt werden und auf einfache Art und Weise an die jeweiligen Anforderungen der jeweiligen Ausführungsformen angepasst werden. Dabei kann die Schicht als einzelne Schicht oder auch als beliebig ausgestaltetes Schichtsystem zum Einsatz kommen. Über die Art und Anzahl der Dotierungselemente können die jeweiligen Eigenschaften der Schicht bzw. des Schichtsystems beliebig variiert werden.

#### Bezugszeichenliste

- 1 mechanische Komponente
- 2 Messschicht (Sensor)

- 3 Stempel
- 4 Gegenkörper
- 5 Schaltkreis
- 6 isolierende Schicht
- 7 Beobachtungsfenster
- 8 Kontakt
- 9 Isolationsschicht für Kontakt
- 10 Hauptrolle
- 11 Andruckrolle
- 12 Ausschnitt eines Zahnrades
- 13 Welle
- 14 Kugel/Rolle
- 15 Strukturierung
- 16 hochohmige Schicht
- 17 niederohmige Schicht mit Strukturierung für zum Bei- 15
- spiel Kontakte und Leiterbahnen
- 18 hochohmige Schicht
- 19 Unterlegscheibe
- 20 Schraubenkopf
- 21 Wenderschneidplatte
- 22 Unterlage (hier Unterlegplatte)
- 23 Isolierte keramische Platte

#### Patentansprüche

- 1. Verwendung einer amorphen Kohlenstoffschicht mit piezoresistiven Eigenschaften als Sensor (2) zur Messung von aktuellen Zustandsgrößen an beanspruchten Oberflächen von mechanischen Komponenten (1).
- 2. Verwendung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Zustandsgrößen die Kraft, die auf die Oberfläche einwirkt, und/oder der Druck gemessen werden.
- 3. Verwendung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die amorphe Kohlenstoffschicht graphitische Strukturen mit  $sp^2$ -Hybridisierung in Kombination mit diamantähnlichen Strukturen mit  $sp^3$ -Hybridisierung aufweist.
- 4. Verwendung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die amorphe Kohlenstoffschicht mit mindestens einem metallischen und/oder nicht metallischen Element dotiert ist.
- 5. Verwendung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass das mindestens eine Element ausgewählt ist unter Si, Ti, W, Cr, Ta, Nb, V, Zr, Hf, Mo, Pb, Cu, Al, Au, Ag, Pt, Ru, Pd, Ni, Co, Sauerstoff, Stickstoff, Ar, F, Wasserstoff oder Kombinationen davon, insbesondere unter Si, Ti, W und Cr.
- 6. Verwendung nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass das mindestens eine Element in der amorphen Kohlenstoffschicht in einer Menge von 0,01 bis 47 at-%, vorzugsweise 1 bis 45 at-%, enthalten ist.
- 7. Verwendung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die amorphe Kohlenstoffschicht als verschleißfester Drucksensor auf Werkzeugen und tribologisch beanspruchten Bauteilen aufgebracht ist.
- 8. Verwendung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die amorphe Kohlenstoffschicht als anti-adhäsiver Drucksensor auf Werkzeugen und Bauteilen aufgebracht ist.
- 9. Verwendung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die amorphe Kohlenstoffschicht in Verbindung mit weiteren Funktionsschichten eingesetzt wird.
- 10. Verwendung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die amorphe Kohlenstoffschicht integra-

ler Schichtbestandteil in einem Mehrschichtsystem ist.  
 11. Verwendung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zusammensetzung einer oder mehrerer Schichten in Bezug auf die schichtaufbauenden Komponenten und/oder die Konzentration einzelner schichtaufbauender Komponenten über die Schichtdicke variiert.

12. Verwendung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die amorphe Kohlenstoffschicht als Mehrlagenschichtsystem aufgebaut ist.

13. Verfahren zur Messung von aktuellen Zustandsgrößen an beanspruchten Oberflächen von mechanischen Komponenten, dadurch gekennzeichnet, dass als Sensor eine Messschicht (2) aus amorphen Kohlenstoff mit piezoresistiven Eigenschaften gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12 eingesetzt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Druck/Widerstandskennlinie und/oder das Widerstandsniveau der amorphen Kohlenstoffschicht in Abhängigkeit von dem Gehalt und der Art des mindestens einen metallischen und/oder nicht metallischen Elements eingestellt wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, dass durch zusätzliche thermoresistive Messung mit einem Thermosensor eine thermische Stabilisierung erfolgt.

16. Sensoranordnung zur Messung von aktuellen Zustandsgrößen von beanspruchten Oberflächen von mechanischen Komponenten (1), dadurch gekennzeichnet, dass als Sensor (2) eine amorphe Kohlenstoffschicht mit piezoresistiven Eigenschaften gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12 eingesetzt wird, wobei die amorphe Kohlenstoffschicht über elektrische Kontakte (8) mit einer Messeinrichtung verbunden ist.

17. Sensoranordnung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der amorphen Kohlenstoffschicht als Messschicht (2) und der Oberfläche der mechanischen Komponente (1) eine isolierende Schicht (6) angeordnet ist, die mindestens an einer Stelle unterbrochen ist, zur Messung der lokalen Beanspruchung der mechanischen Komponente (1) an dieser Stelle.

Hierzu 13 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

This page blank (uspio)



Fig. 1

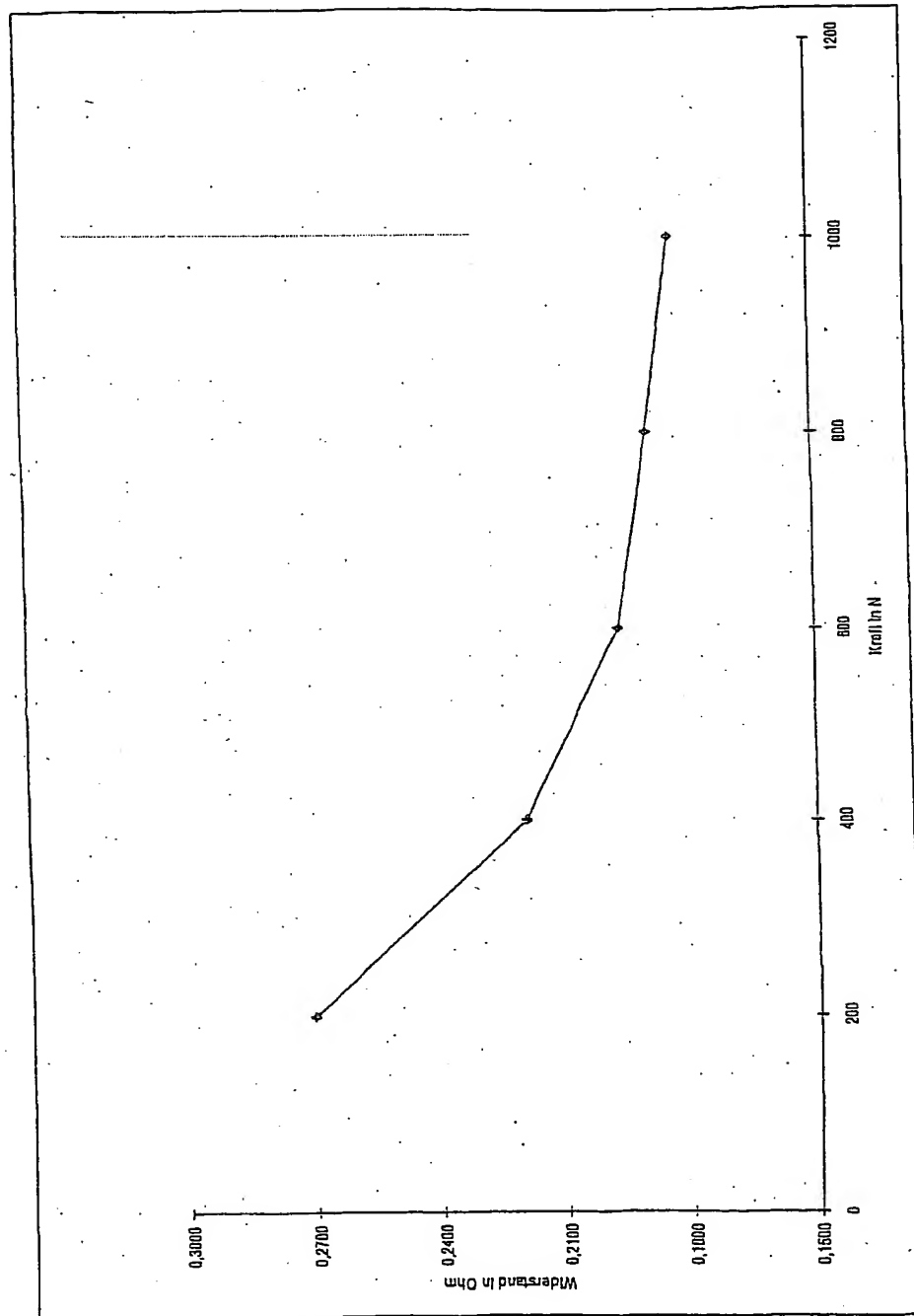


Fig. 2

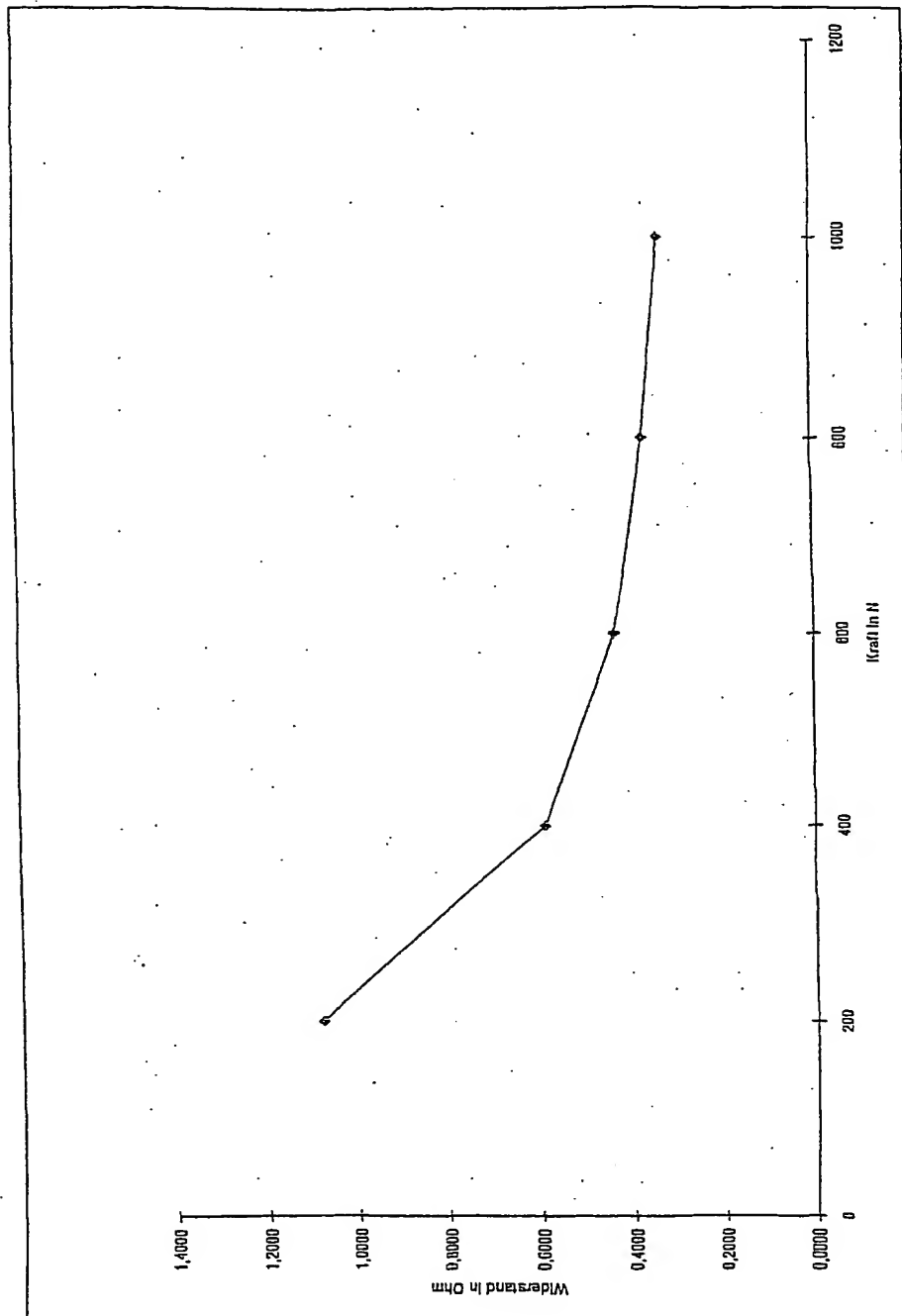


Fig. 3

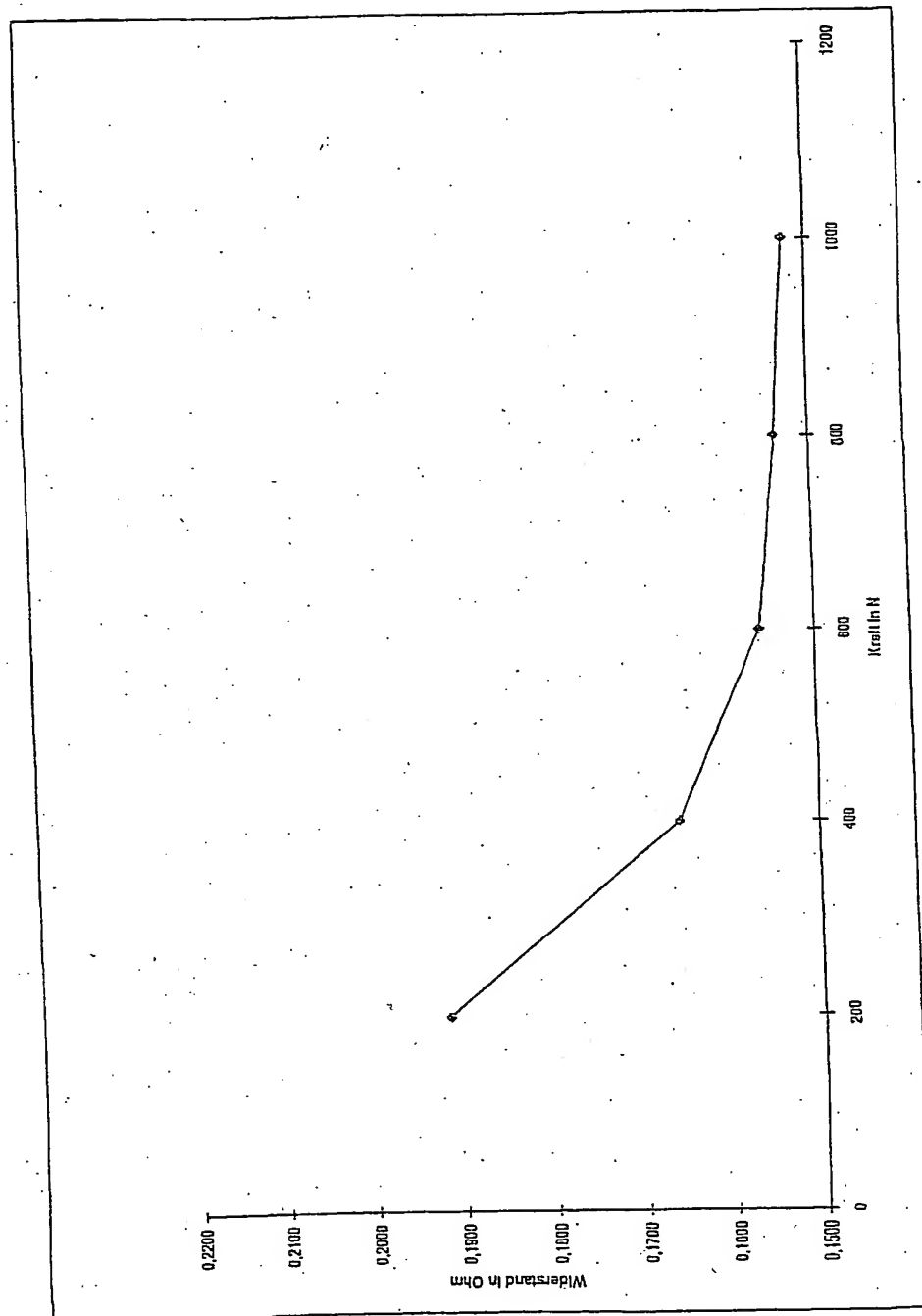


Fig. 4

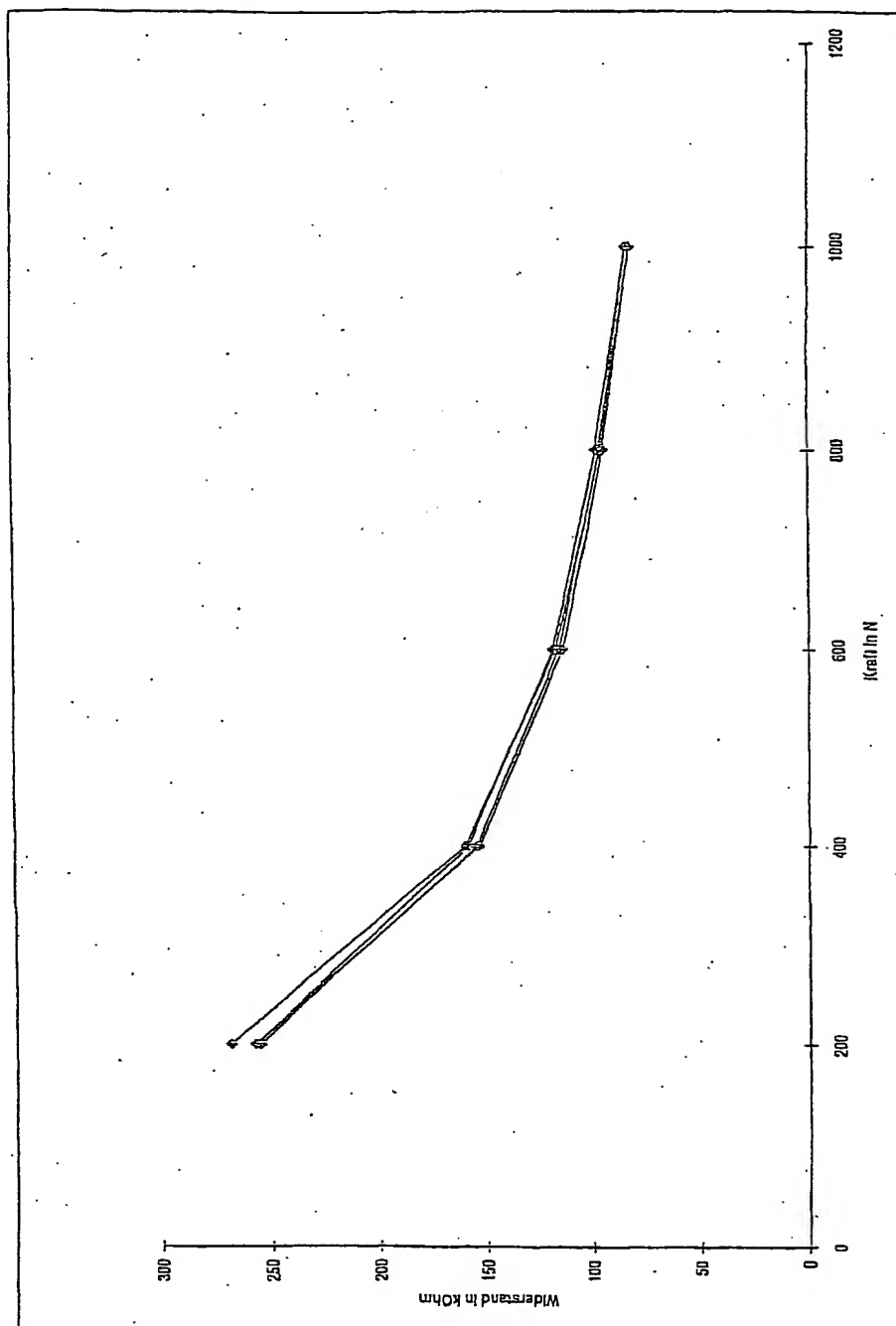


Fig. 5

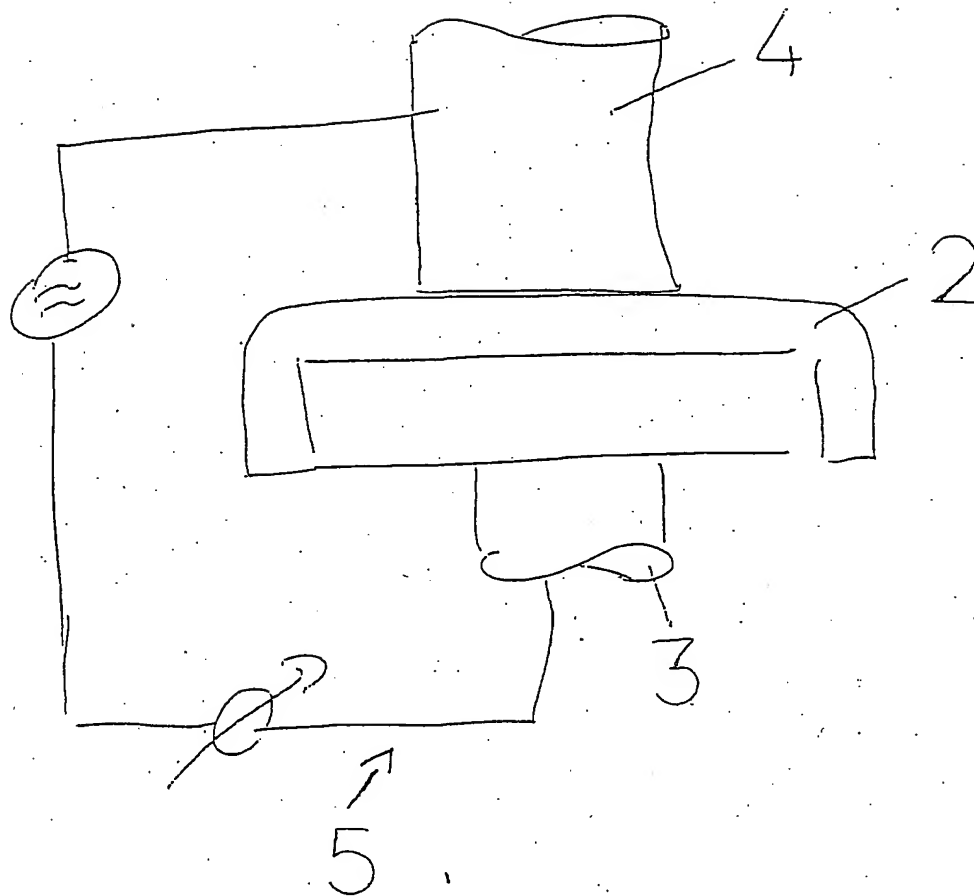


Fig. 6

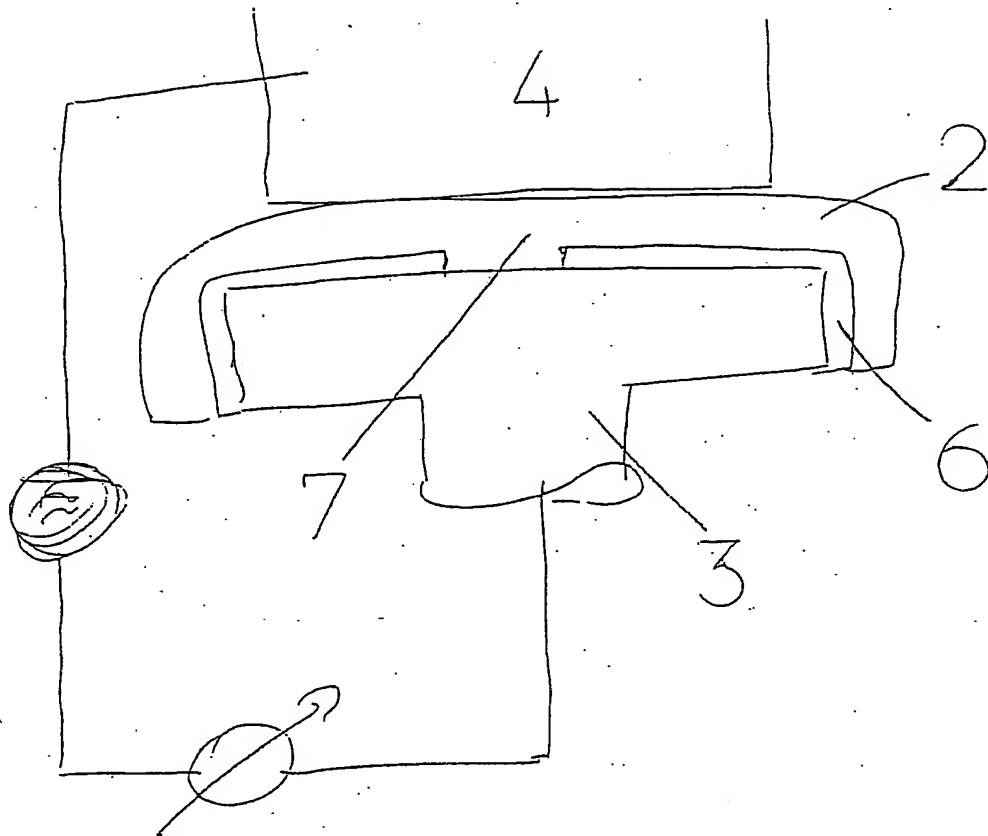


Fig. 7

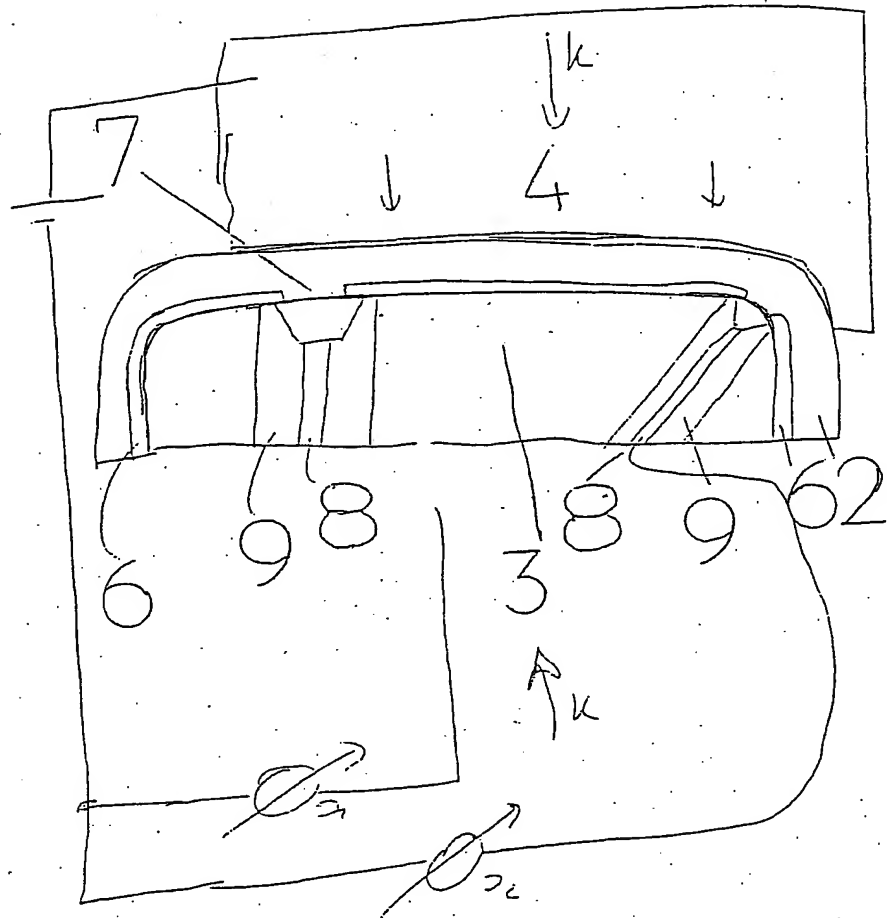


Fig. 8

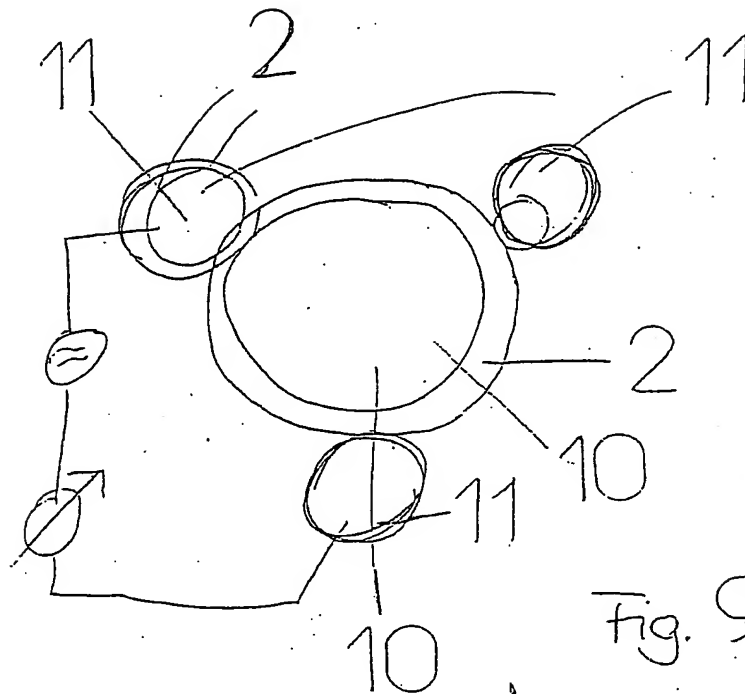


Fig. 9

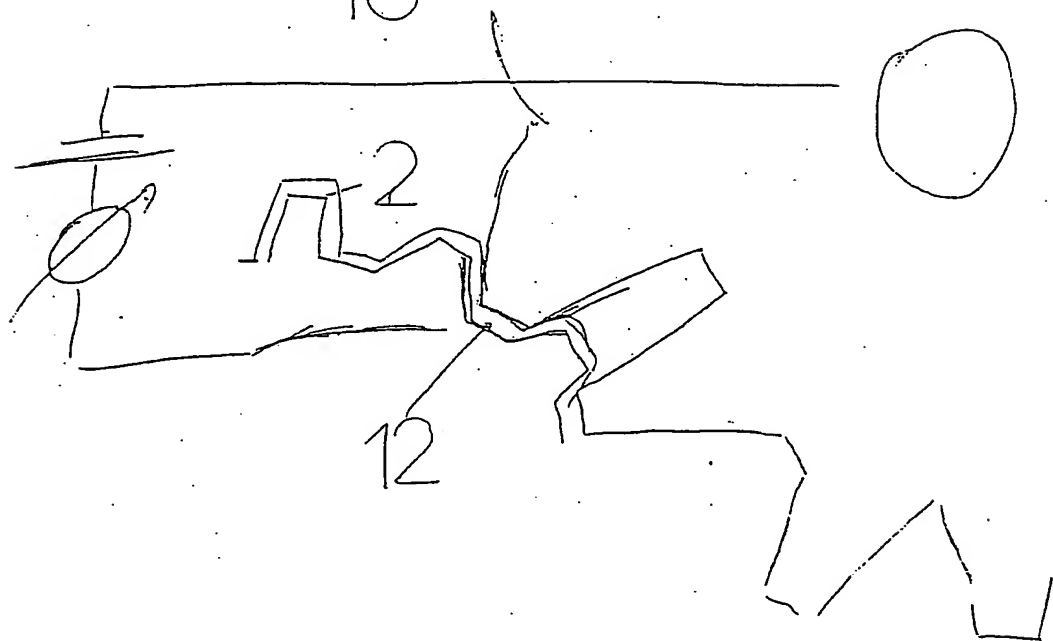




Fig. 10

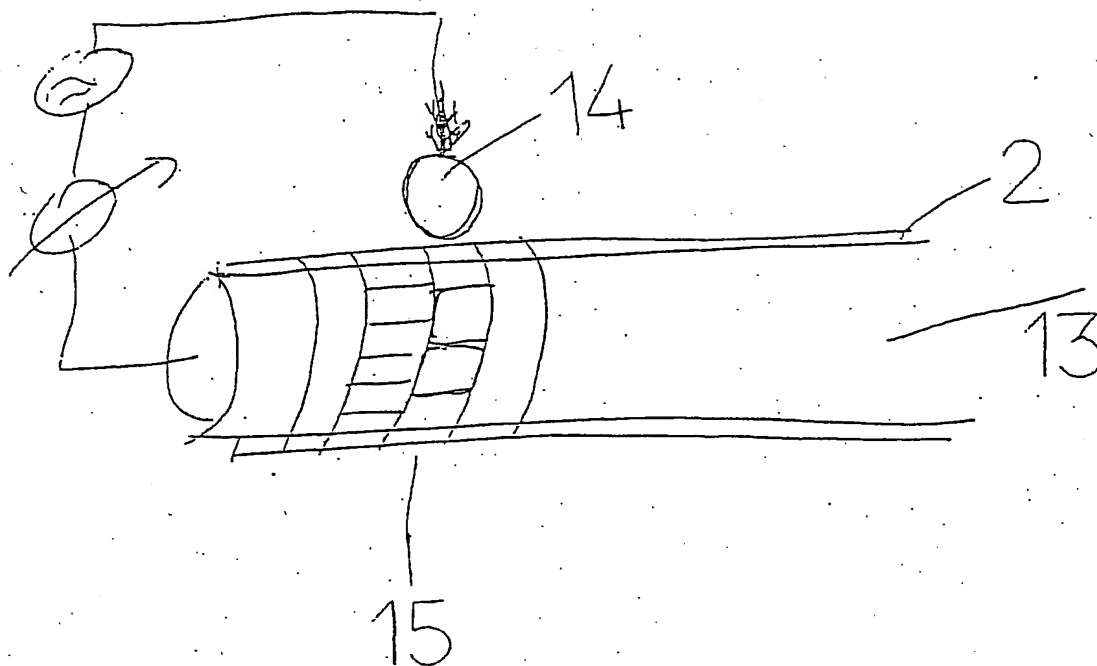


Fig. 11

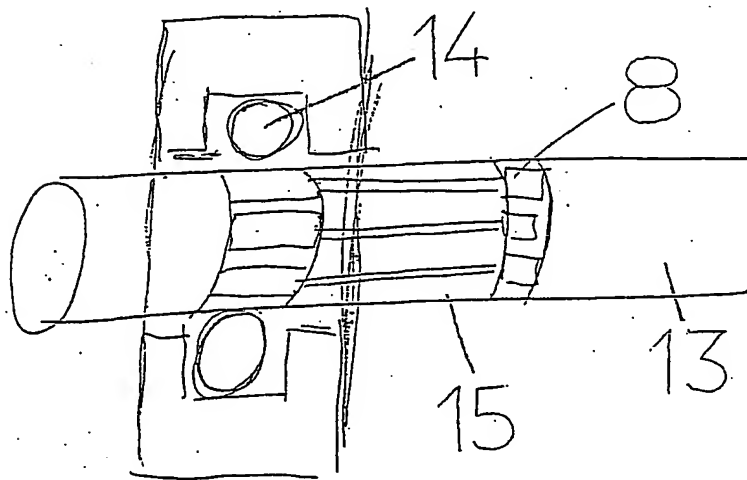
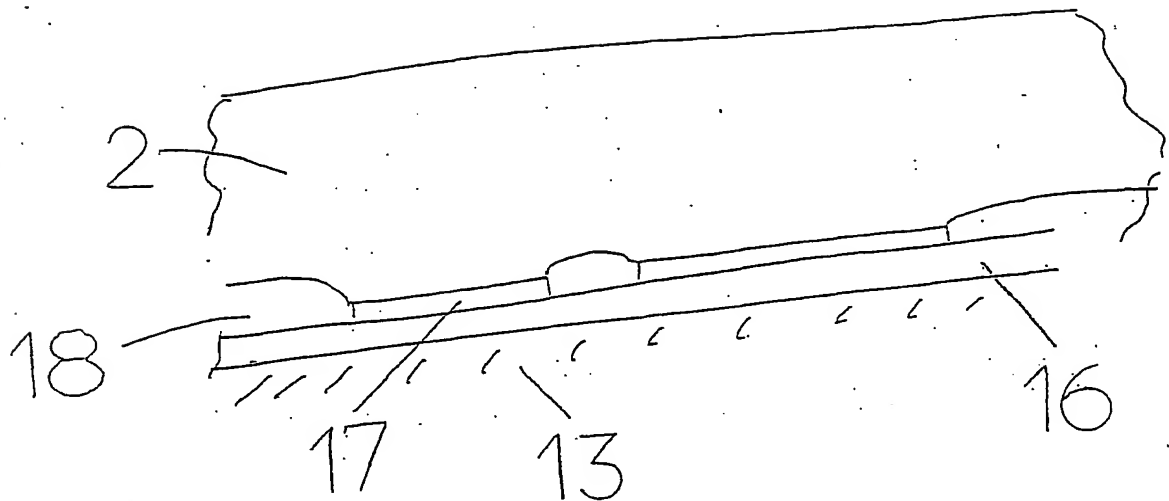


Fig. 12

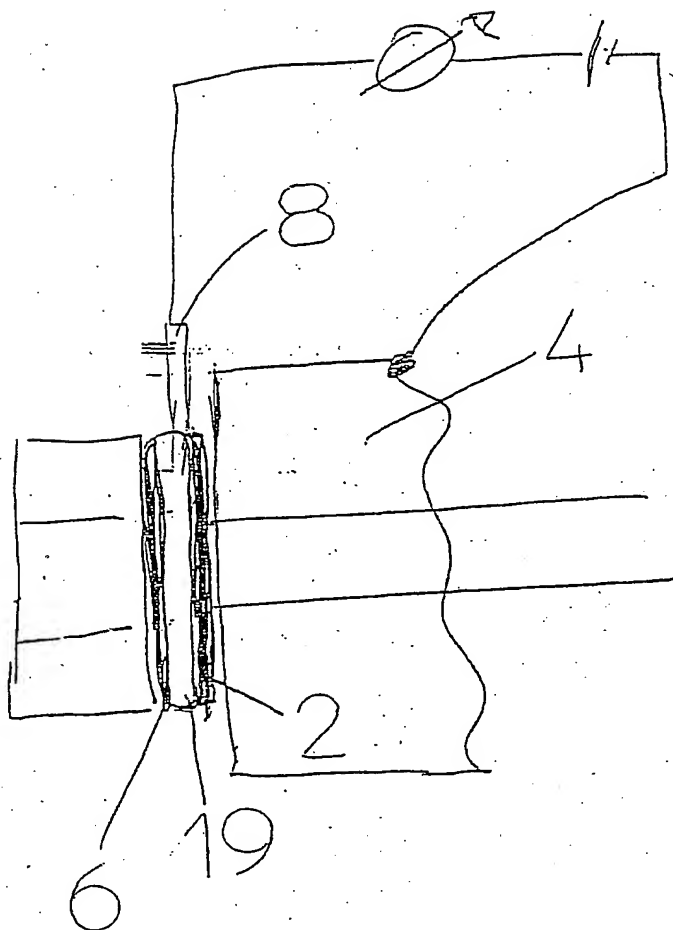


Fig. 13

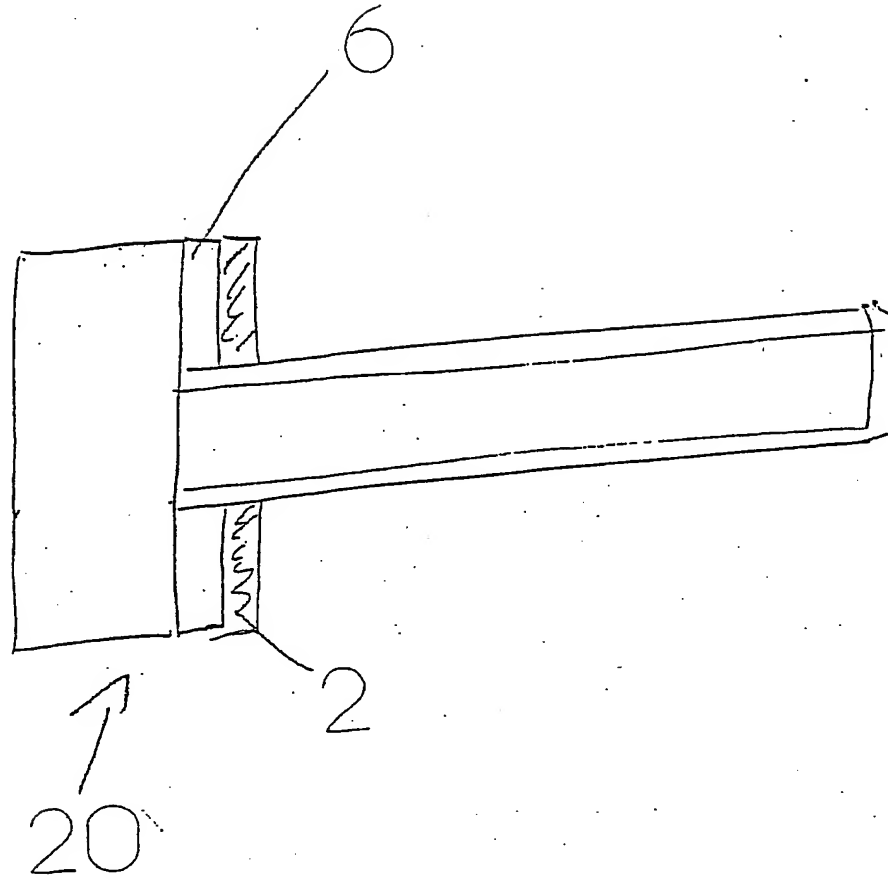
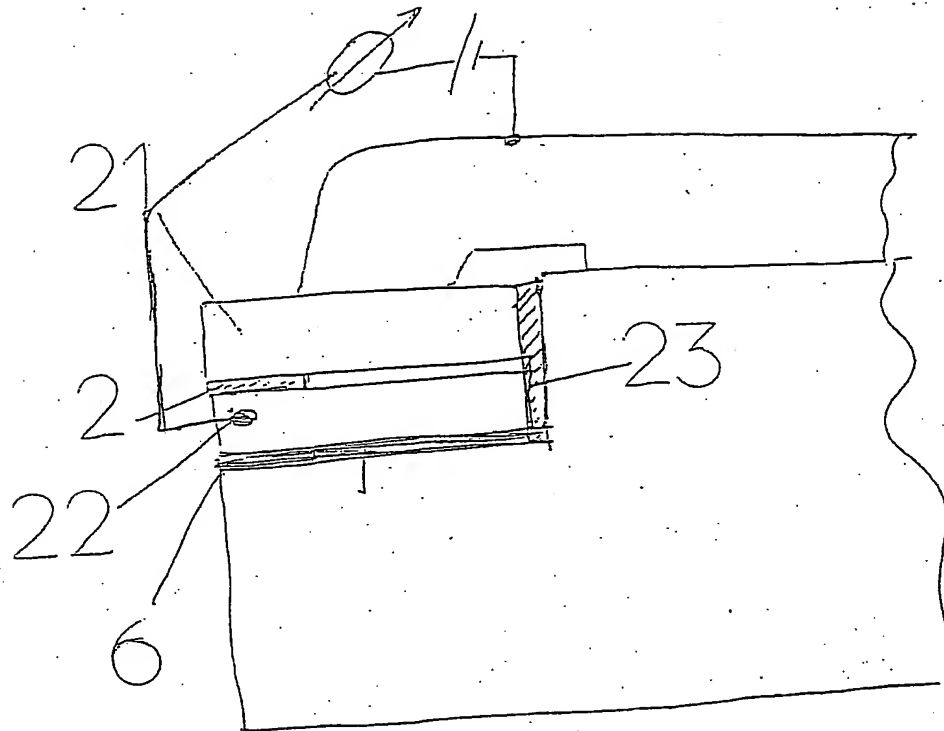


Fig. 14



**This Page Blank (uspto)**